

GPS 跨河水准测量法在东营河广大道工程中的应用

孙运彬 李志刚

正元地理信息集团股份有限公司山东分公司

DOI:10.32629/gmsm.v2i3.172

[摘要] 本文重点介绍了 GPS 跨河水准测量法的原理及实践应用情况,以东营河广大道工程中黄河的 GPS 跨河水准为例,通过工程实践证明采用 GPS 跨河水准测量法可以进行高精度跨河高程传递,其各项精度指标完全能够满足精密工程要求。

[关键词] GPS; 跨河水准; 大地高; 正常高; 高程异常

1 跨河水准测量应用背景

河广大道公路项目为东营市 2017 年重点工程项目,其北起河口蓝色经济开发区北侧的规划 G228 丹东线,南至广饶拟建的 S227 西环改线,全长 98.7 公里,拟采用双向六车道一级公路标准建设,设计速度 100 公里/小时,路基宽度 33.5 米。全线共拟设置黄河、小清河特大桥 2 座,大桥 4 座,中桥 11 座;互通立交 5 处,公铁分离立交 5 处,车行天桥 2 处,平面交叉 35 处;停车区 2 处,综合服务区 1 处;交通量观测站 5 处。

该工程项目设计单位为东营市公路勘察设计院,受其委托,我公司负责全线控制测量、带状地形图测量、放线和纵横断面测量等工作;并负责在线路跨越黄河、小清河的特大桥的两侧布设二等精密施工控制网。工程技术人员在经过线路踏勘和综合分析研究后,决定在黄河两岸之间和小清河两岸之间分别进行二等跨河水准测量。

2 跨河水准测量方法选择

目前,跨河水准测量可采用的方法有:光学测微法、倾斜螺旋法、经纬仪倾角法、测距三角高程法及 GPS 跨河水准测量法等。前四种方法受跨距、外界测量环境及地形影响较大,如光学测微法最长跨距为 500m,倾斜螺旋法最长跨距为 1500m,经纬仪倾角法、测距三角高程法最大跨距虽可达 3500m,但受湿度、光线、通视条件限制。而 GPS 跨河水准测量法最大跨距亦可达 3500m,且受环境、地形、通视条件影响较小,可全天候作业,作业效率相对较高。

东营河广大道的黄河特大桥全长 3296 米,小清河特大桥全长 2077.5 米,河两岸地势较为平坦,但河堤内树木较密,通视条件较差,经过综合比较以上各方法,项目决定选择 GPS 跨河水准测量方法进行河两侧跨河点二等水准高差的测定。

3 简介 GPS 跨河水准测量方法

3.1 跨河水准测量原理

3.1.1 GPS 定位能够获得控制点的大地高 H ,再利用各点的高程异常 ξ 值,则可按下式计算出各点的正常高 h :

$$h = H - \xi \quad (1)$$

利用 GPS 静态相对定位技术可以得到较高精度的大地高 H ,只要求出各点的高程异常 ξ ,就可通过上式计算出正常高 h 。因此,GPS 高程测量的关键在于高程异常的求解,即测区似大地水准面的确定,常用的方法有 GPS 水准法、GPS 重力法等。

目前,工程单位应用最多的是 GPS 水准拟合法,即利用 GPS 水准点建立测区的高程异常拟合模型,用以推求其他未联测水准的 GPS 点的高程异常,再根据下面②式计算正常高高差。

3.1.2 GPS 跨河水准测量的基本思路是:通过 GPS 观测及岸上水准联测,采用 GPS 水准拟合法,建立跨河线附近的高程异常拟合模型,推求两岸跨河点之间的高异常差 $\Delta \xi$,再结合他们之间的 GPS 大地高差 ΔH ,按式②计算跨河点之间的正常高高差 Δh :

$$\Delta h = \Delta H - \Delta \xi \quad (2)$$

3.1.3 常用的高程异常拟合模型有线性拟合模型、曲线拟合模型、曲面拟合模型、综合模型等。当跨河场地地形变化不大时,跨河线可接近直线布设,并按线形模型进行高程异常拟合。

由式①可知: $\Delta \xi = \Delta H - \Delta h$ (3)

3.1.4 利用式③由同岸跨河点与非跨河点之间的大地高高差、正常高高差即可推求出跨河点之间的高程异常差。取两岸对象推算的高程异常差的距离加权平均值,按式②就可以求出两岸跨河点之间的正常高高差。具体计算步骤和公式如下:

由同岸跨河点与非跨河点计算跨河线上测点间的高程异常变化率 α

$$\alpha = (\Delta H - \Delta h) / S \quad (4)$$

式中: ΔH 为两点间的大地高高差(m), Δh 为两点间的正常高高差(m)

S 为两点间的水平距离(km)

将跨河两岸得到的不同 α 值取平均作为跨河线上测点间的高程异常变化率 α 。由此可计算跨河点之间的高程异常差: $\Delta \xi = \alpha \times S$,然后再按式②计算出跨河点之间的正常高高差 Δh 。

3.2 线形拟合模型

3.2.1 对于地势变化比较平缓的局部地区,可设计如图 1 施测网形:



图 1 施测网形

其中 B、C 为跨河点,其他点为非跨河点;非跨河点与相邻跨河点距离与跨河距离大致相等;A1、A2 及 D1、D2 对称分布于 BC 直线上。且满足以下要求:

$$(1) SA_1A_2 \leq 1/4 \times SBC; \quad SD_1D_2 \leq 1/4 \times SBC$$

$$(2) SA_1A_2 - SD_1D_2 \leq 1/25 \times SBC;$$

$$(3) SA_2B = SD_2C = SBC;$$

(4) A2、B、C、D2 四点位置同时满足一元线性方程: $Y=aX+b$

3.2.2 对于跨河的 B、C 两点, 其水准高差及高程异常差有如下关系式:

$$h_{BC}=H_{BC}-\xi_{BC} \quad (1)$$

$$\xi_{BC}=H_{BC}-h_{BC} \quad (2)$$

式中 ξ_{BC} 为跨河点 B、C 高程异常差; H_{BC} 为跨河点 B、C 大地高差; h_{BC} 为跨河点 B、C 正常高差。

通过静态 GPS 测量, 可以计算出各点间的大地高差, 同边非跨河点与跨河点间的水准高差可以通过一等或二等水准测量得出, 由式②可以计算出 B、C 间的高异常差 ξ_{BC} 。

3.2.3 定义高异常差变化率 $\Delta \xi_{ij}$ 与距离 S_{ij} 有如下线性关系:

$$\Delta \xi_{ij}=f(S_{ij})=\xi_{ij}/S_{ij} \quad (3)$$

其中: S_{ij} 为 i、j 两点间的平面距离。

则图 1 所示跨河点 B、C 间高程异常差为:

$$\xi_{BC}=[(\Delta \xi_{A1B}+\Delta \xi_{A2B})/2+(\Delta \xi_{BD1}+\Delta \xi_{BD2})/2]/2 \times S_{BC} \quad (4)$$

将式④代入式①即可求得跨河点间的水准高差。

3.3 GPS 跨河水准测量误差分析

3.3.1 GPS 高程转换用到三个量, 分别为 GPS 所测的相对于参考椭球的大地高、几何水准所测的相对于似大地水准面正常高, 以及通过重力测量等手段得到的地球重力场模型。所以考虑 GPS 水准的误差源, 应分别考虑影响大地高、正常高、地球重力场模型精度的因素以及它们的综合作用。

3.3.2 影响 GPS 大地高精度的主要因素有 GPS 星历误差、对流层对 GPS 信号的折射影响等。卫星星历误差取决于卫星跟踪站的数量及空间分布、观测值的数量及精度、轨道计算时所用的轨道模型及定轨软件的完善程度等, 它是影响 GPS 高程测量精度的主要因素, 其主要源于 GPS 卫星轨道摄动的复杂性和不稳定性。对流层折射影响是指 GPS 信号通过对流层和平流层交界时, 传播的路径发生弯曲而产生测量偏差。

3.3.3 影响正常高精度的因素主要是水准测量误差。

3.3.4 地球重力场模型精度, 即高程异常变化率 α 的求解精度, 取决于所选跨河区域的平坦程度, 以及跨河点选择的均匀程度。在小区域平坦地区, 我们认为高程异常变化率是一致的。

3.4 提高 GPS 跨河水准精度措施

3.4.1 提高 GPS 观测、解算精度。如控制点必须使用强制对中装置; 改善 GPS 星历的精度; 削弱卫星不对称对定位精度的影响; 选择最佳的卫星几何图形, 选用双频 GPS 接收机, 有效的消除电离层折射的延迟误差, 减弱多路径误差和对流层延迟误差; 提高整周模糊度的解算精度等。

3.4.2 提高联测几何水准精度。用精密水准联测, 可以有效提高正常高精度。

3.4.3 尽量选择河流两岸大地水准面具有相同的变化趋势、且变化相对平缓的方向上布设跨河路线; 水准路线尽量直伸且等距, 可有效地抵消地球重力场模型带来的误差。

4 GPS 跨河水准测量法在工程项目中的应用

4.1 工程项目概况

拟建的河广大道路线北起河口蓝区 G228 沿海高等级公路与海防路交叉口位置, 向南利用海防路, 在大学堂村西南与 G340 东子线平交, 于王家洼村北进入利津县境内, 经林河村东, 于 G18 荣乌高速利津服务区东上跨 G18, 在新建村南下穿拟建东营港疏港铁路, 于 G516 沾青线盐罗分干桥东平交 G516, 顺接黄河大桥新合村西—宁家村东桥位线位, 于垦利区崔家庄南上跨 S507 东利线, 路线继续向南沿胜坨镇区及中心城区规划西外环通道布线跨广利河、哨头水库、S228 黄临线、张东铁路、电厂专线、G220 东深线至南三路, 于油郭村东北下穿在建黄大铁路、德大铁路, 经东范村东, 向南跨支脉河, 于北户村西南下穿 S309 田高线与在建长深高速, 经温楼村东, 于范李村北跨小清河后止于项目终点, 在范李村西终接规划 S277 河辛线广饶绕城改建工程。

4.2 项目重点

河广大道拟建两座跨河特大桥, 分别为黄河特大桥与小清河特大桥。这两座特大桥的建设将成为本项目的重点工程。

黄河特大桥于利津盐窝镇南十六户村、新合村之间上跨黄河, 向南至垦利县宁家村东, 该桥全长 3296m, 由北引桥工程、主桥工程、南引桥工程三部分组成, 桥面宽度 25.32m, 属特大型公路桥梁。大桥中线大致为南北向, 桥轴线处两岸堤距 2293 米, 南岸滩地宽 665 米, 主槽宽 664 米, 北岸滩地宽 964 米。坝宽约 73 米。小清河特大桥相继跨越小河水河、引黄济青干渠、小清河, 顺路线前进方向由北向南, 桥梁全长 2077.5m。

为满足两座特大桥的勘测设计和施工要求, 为大桥建立高精度的跨河平面与高程控制网, 项目采用了二等 GPS 跨河水准测量的方法进行大桥跨河主体控制网平面及高程控制网的测量, 并采用 S05 级 Trimble DINI03 数字水准仪配因瓦标尺进行往返观测, 进行二等水准高程测量与检查。下面仅以黄河特大桥为例介绍 GPS 跨河水准测量。

4.3 黄河特大桥 GPS 跨河水准测量

4.3.1 选点与埋石

桥址区域内地形较为平坦, 地形起伏不大, 符合现行《国家一、二等水准测量规范》中 GPS 跨河水准条件。按照图 1 施测网形的要求, 经实地踏勘, 测量场地选择在黄河盐窝宁海浮桥东约 900m 处, 跨河段约 2102m。所有点均埋设在稳定、观测条件好的地方。

4.3.2 GPS 外业观测

GPS 观测使用 6 台中海达 F61 双频三星 GPS 接收机进行 GPS 静态相对定位, 获取跨河点和非跨河点的高精度坐标和大地高, 采样率为 10s, 卫星截止高度角为 15°, 共观测 8 个时段, 每个时段 2h。

根据《国家一、二等水准测量规范》GB/T 12897-2006 要求, 二等水准须精确到 0.1mm, 为使测量的仪器高精度达到 0.1mm, 借鉴水准测量仪器及方法, 将电子水准仪设在 GPS 水准点附近, 分别读取以下两个值:

(1) 因瓦尺直接立于 GPS 水准点上的读数 h_1 。

(2)脚架摆稳后,因瓦尺立于基座上的读数 h_2 。

两次读数之差,即为 GPS 水准点静态测量的仪器高。静态测量前后各测量一次,其差值要在 1mm 内,取平均值作为最终的仪器高。

4.3.3 非跨河段高差观测

图 1 中,非跨河段 D1C、D2C、BA1、BA2 的高差采用电子水准仪、按照一等水准精度进行观测;在 GPS 静态观测前后各观测 1 次,各段高差互差及偶然中误差要满足一等水准测量规范要求。

4.3.4 GPS 数据处理

GPS 基线采用 HGO 数据处理软件和精密星历进行结算。基线结算分两步进行:首先,在 ITRF2005 框架下,引入的全球跟踪站与跨河 GA 构成“框架网”,获得 GA 高精度的 ITRF2005 坐标;第二步,以 GA 的 ITRF2005 坐标作为 GPS 跨河网的起算坐标,并作为松弛的坐标基准,推算其它跨河点的坐标。在 HGO 结算中,基线解的 RMS 值是衡量同步环质量好坏的一个指标,一般要求 RMS 值小于 0.5。本网所有 RMS 值均小于 0.4,说明 GPS 网的整体外业观测质量较高,基线解的精度较好。

4.3.5 GPS 平差计算

GPS 网平差采用中海达 GPS 随机软件 HGO 进行,在 ITRF2005 框架下进行三维无约束平差,起算点为 GA。三维无约束平差的结果反映了整个 GPS 网的内符合精度,网中最弱边、最弱点精度以及坐标分量最大误差见表 1,其中 GPS 大地高的精度为 0.26cm,精度较高。

表 1 三维无约束平差结果

| | | |
|-----------------------------------|--|---|
| PVV/cm ² | | 15.693 |
| M/cm | | 0.264 |
| 最弱点 D2/cm | | $MX=0.09$ $MY=0.08$ $MZ=0.10$ $MS=0.15$ |
| 最弱边 A ₁ A ₂ | | $S=7.124$ m, $MS=0.2$ mm |
| 最大相对闭合差的闭合环 | | $DS=2.03$ mm, $DS/S=1.06$ ppm |
| 最大绝对闭合差的闭合环 | | $DS=3.29$ mm, $DS/S=0.73$ ppm |
| 差值最大的重复基线 A ₁ | | $DS=4.97$ mm |

4.3.6 高差计算

根据 GPS 跨河水准的方法和计算步骤,跨河段高差的计算结果如表 2:

表 2 高差计算表

| 水准段 | 大地高差 $d_n=(H_{n1}-H_{n2})$ | 水准高差 $d_n=(h_{n1}-h_{n2})$ | 高程异常差 (d_n-d) | 平距 S/km | 高程异常变化率 $(d_n-d)/S$ |
|------------|---|-------------------------------|--------------------|------------|------------------------|
| A1—B | 7.0493 | 7.03828 | +0.01102 | 2.103 | +0.00524 |
| A2—B | 7.1126 | 7.10035 | +0.01225 | 2.102 | +0.00583 |
| C—D1 | -7.3394 | -7.31323 | -0.02617 | 2.102 | -0.01245 |
| C—D2 | -7.3383 | -7.31201 | -0.02629 | 2.101 | -0.01251 |
| 跨河段 B—C | $a_{BC}=(0.00524+0.00583-0.01245-0.01251)/4=-0.00347$ | | | | |
| | 大地高差: $dH_{BC}=H_C-H_B=-0.1133$ | | 平距: $S_{BC}=2.102$ | | |
| | 水准高差: $dH_{BC}=dH_{BC}-a_{BC}*S_{BC}=-0.10601$ | | | | |

4.3.7 精度分析

GPS 跨河水准的精度主要受精密水准测量误差、GPS 大地高

高差误差、拟合模型误差、似大地水准面的粗糙程度和 GPS 水准点数量及其分布的影响。本项目中精密水准测量按国家一等水准的技术要求进行,每公里偶然中误差优于 0.45mm;GPS 跨河网经过高精度数据处理后,最弱点的大地高中误差为 2.1mm;跨河场地位于黄河下游的平原地区,同岸及不同岸高程异常变化率的差分别为 0.007m 及 -0.003m,说明似大地水准面的变化趋势是平缓的,GPS 水准点按近似垂直于河道的直线布设,采用线性拟合模型是合理的。综合上述分析,在本项目所处的场地条件下,运用精密 GPS 的观测和数据处理方法,GPS 跨河水准测量成果达到二等跨河水准的精度要求,满足黄河大桥施工的需要。

5 应用心得

5.1 精确获取 GPS 水准点间的大地高高差和正常高高差是关键。大地高高差的精度主要取决于选择高质量的仪器设备、高精度的数据处理软件以及制定合理的观测方案;正常高高差的精度主要取决于同岸 GPS 水准点间水准联测精度,联测等级应高于跨河水准等级要求。

5.2 GPS 静态测量时,采用同一型号的双频 GPS 接收机,可以有效消除天线相位中心偏差的影响;宜采用连续观测的方式,一次性获取足够长时间的观测数据,然后切分成若干段进行数据处理,可克服量高误差的影响。

5.3 虽然广播星历和参考点坐标(绝对定位获取)对短边的影响很小,但采用 GPS 精密星历及理想的 WGS84 参考位置可提高基线解算精度。

5.4 GPS 水准测量布设简单,施测方便,作业效率高;数据处理结果显示,在地势变化不大的区域,GPS 水准测量方法可以取代传统跨河水准测量法用来进行高精度跨河水准测量。

6 结束语

运用 GPS 水准测量法实施高精度、大跨距的跨河水准测量,在按照跨河现场的实际状况运用科学的拟合模型为基础,完全能够实现与传统跨河水准测量形式的高精度。而且 GPS 水准测量具备费用低廉、不遭受视环境约束以及较高的效率等优势,所以其具备非常高的经济实用性,此技术方法在后期的精密工程测量之中将会有更加广泛的发展前景。本论文重在实践应用,相信会对从事相关工作的同行有着重要的参考价值 and 借鉴意义。

【参考文献】

- [1]王语.跨河精密水准测量研究[J].河南科技,2015,(22):36.
- [2]黄武.GPS 在贞山大桥跨河水准测量中的应用[J].全球定位系统,2014,(12):69.
- [3]叶长青,范存国.GPS 跨河水准测量技术探讨[J].科技信息,2012,(03):92-93.

作者简介:

孙运彬(1982--),男,山东聊城人,汉族,工程师,现工作单位:正元地理信息集团股份有限公司山东分公司。